21世纪

高等院校创新教材

GAODENG YUANXIAO CHUANGXIN JIAOCAI

大学物理（上）

徐 超 刘修生 主编

科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书为高等院校大学物理课程教材，根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的要求，结合编者的教学经验，同时吸取国内外同类教材改革的优秀成果编写而成. 本教材分上、下两册，上册内容包括力学和热学两篇，共分八章，每章后配有习题，书末附有参考答案.

本书理论与实践、实验紧密结合；重在应用，适合应用型专业；例题、习题偏重工程方面，兼顾其他. 故本教材是普通高等院校工科类本科各专业大学物理课程的理想教材，也可作为其他类别学生的相同课程教材，还可作为教研参考书.

图书在版编目（CIP）数据

大学物理. 上/徐超，刘修生主编. – 北京：科学出版社，2006
（21 世纪高等院校创新教材）
ISBN 7-03-016751-1

I.大… II. ①徐…②刘… III.物理学 – 高等学校 – 教材 IV.O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 000816 号

责任编辑：江 兰／责任校对：董 丽
责任印制：高 嵘／封面设计：张 琴

科 学 出 版 社 出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
武汉大学出版社印刷总厂印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2006 年 1 月第 一 版 开本：B5（720×1000）
2006 年 1 月第一次印刷 印张：14 1/4
印数：1~5 000 字数：276 000

定价：20.80 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前　　言

本书根据教育部《高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》的要求，结合编者的教学经验，同时吸取国内外同类教材改革的优秀成果编写而成. 在编写过程中，我们力求突出重点，由浅入深，强化方法，以理工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求为依据，适度加强近代物理知识和新科技物理基础，使本套教材便于教，利于学. 同时在以下几个方面作出了努力：

1. 在课程结构上，我们将大学物理课程分为两个平台，即基础部分和选学部分. 基础部分是各理工科专业的必修内容；选学部分由各理工科专业按各自要求和发展的需要进行选学，书中带“*”的为选学部分.

2. 在教学内容上，我们删去了繁琐和冗长的理论推导，精选了例题和习题，加强了理论联系实际的篇幅，突出了物理模型在解决实际问题中的重要作用.

3. 加强了近代物理知识，书中将相对论、量子论的基本原理和基本概念以及近代物理在高新技术和交叉学科中的应用纳入物理教学，同时用现代物理观念来审视经典物理内容，对物理学前沿进展做了适当的介绍.

本教材分上、下两册. 上册包括质点运动学、质点动力学和动量守恒、机械能守恒与角动量守恒、刚体的运动、振动和波、相对论基础、气体动理论、热力学基础等八章，参考教学时数为50学时；下册包括真空中的静电场和稳恒电场、静电场中的导体和电介质、电磁相互作用、磁场和磁介质、电磁感应、电磁场和电磁波、光的干涉、光的衍射、光的偏振、量子力学基础、原子核物理和粒子物理简介、新技术的物理基础等十二章，参考教学时数为70学时.

本教材上册由徐超、刘修生任主编，李幸、何丽萍任副主编；下册由李相波、何丽萍任主编，李幸、张校飞任副主编. 各章编写分工如下：第一、二章由刘修生编写，第三、四章由徐超编写，第五、六、九、十章由李幸编写，第七、八、十五、十六、十七章由何丽萍编写，第十一、十二章由李健编写，第十三、十四章由张校飞编写，第十八章由李相波编写，第十九、二十章由吴鉴编写. 秦熙明教授认真审阅了全书，提出了宝贵的意见.

由于编者水平有限，加之时间比较仓促，教材中一定存在不妥之处，希望专家、同行、读者批评指正，使本书在教学实践中不断得到完善.

编　者

2005年9月

目　　录

第一篇　力　　学

第二篇　热　　学

第一篇　力　　学

力学是一门古老的学科，在西方其渊源可以追溯到公元前4世纪，古希腊学者柏拉图认为圆的运动是天体最完美的运动，亚里士多德提出力产生运动的说法.在中国可以追溯到公元前5世纪，《墨经》中有关于杠杆原理的论述.但力学成为一门学科应该从17世纪伽利略论述惯性运动开始，牛顿提出了著名的牛顿三大运动定律.现在以牛顿定律为基础的力学理论叫作牛顿力学或经典力学，它曾经被誉为完美普通的理论而兴盛了300年.在20世纪初虽然发现了它的局限性，在高速领域为相对论所取代，在微观领域为量子力学所取代，但是在一般的技术领域，包括机械制造、土木建筑，甚至航空航天技术中，经典力学仍然处于基础理论的地位.由于经典力学是最早形成的物理理论，后来的许多理论，包括相对论和量子力学的形成都受到它的影响.

力学研究物体的机械运动.本篇主要介绍运动力学、刚体的转动、牛顿三大运动定律，以及由此引入的力、力矩、动量、冲量、角动量、功和能的概念，动量、角动量、机械能等的守恒定律，并且讨论了振动和波的性质、定律等.

第一章　质点运动学

物理学是关于自然界最基本形态的学科，它研究物质的结构、相互作用以及运动规律，具体的是研究机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核运动以及其他微观粒子运动. 其中，机械运动是最基本最常见的运动形式. 物体的机械运动又可分为平动和转动两大类. 若物体在平动过程中，其内部各点的位置没有发生相对变化，其形状大小与物体运动研究无关，则描述此类运动的物体就可用质点代表. 在质点运动学中，牛顿三大运动定律是重要的理论基础. 为了更好地掌握牛顿运动定律，本章将着重讨论三个方面的问题：

第一，如何描述物体的运动状态. 在运动学中，物体的运动状态用位矢、速度来描述，而物体的运动速度的变化则用加速度来描述. 通过速度、加速度等概念的建立，加深对运动的相对性、瞬时性和矢量性的认识.

第二，运动学的核心是运动表达式. 既要掌握如何从运动表达式出发，求出质点在任意时刻的位矢、速度和加速度的方法，又要掌握从速度、加速度、位矢、时间等已知量求质点运动表达式的方法.

第三，分析特殊的运动——圆周运动的一些运动规律.

§1　质点　参考系　运动表达式

一、质　点

任何一个物体都有一定的大小、形状、质量，但如果研究物体的运动可以忽略其大小和形状，或者只考虑到物体的平动，则可以把此物体当作一个具有一定质量的点，这样的点通常被称为质点.

例如，研究地球绕太阳的公转时，由于地球的平均半径（约为 $6.4\times10^3\,\text{km}$）比地球与太阳之间的距离（约为 $1.50\times10^8\,\text{km}$）小得多，地球上各点相对于太阳的运动也可以看作相同，可以把地球作为一个质点来处理（如图 1-1 所示）. 研究地球表面或表面附近的物体运动时，由于地球半径相对于地球与物体之间的距离来讲不能忽略，这时就不能把地球当作质点来处理.

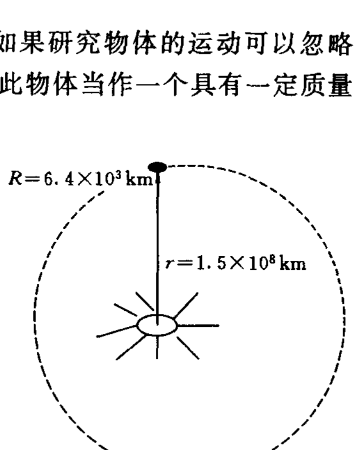

图 1-1　地球可当作质点

在许多实际问题的处理过程中，把物体当作质点的抽象研究方法具有实际意义. 当我们研究的物

体不能当作质点处理时，可把整个物体看成是由许多质点组成的，从分析这些质点的运动入手，就有可能了解整个物体的运动规律．所以研究质点的运动规律是研究物体运动的基础．

二、参考系

在自然界中，所有的物体任何时刻都在运动，因此运动是物质本身的固有属性．这就是人们常说的运动的绝对性．

要描述物体的运动状态，就要选择其他的物体（或物体组）作为参考标准，被选择作参考的物体（物体组）叫作参考系．如一个物体在地球上做自由落体运动，就是选择地球或地面作为参考系；要研究宇宙飞船绕地球运动时，选择地球作为参考系；当研究地球等行星绕太阳转动时，选择太阳作为参考系．一般地，研究地球表面物体的运动通常选择地球作为参考系．

同一物体的运动，由于我们选择的参考系不同，对它的运动的描述也会不同．如在匀速行使的列车上，一个小球自由下落，列车上的乘客看到小球做直线运动，而在地面上站立不动的人将会看到小球做抛物线运动，这反映了物体运动的相对性．因此，要明确地描述一个物体的运动，只有在选定了某个确定的参考系后才有可能．

确定参考系后，为了定量地描述物体相对于参考系的位置，就需要在此参考系上选用一个固定的坐标系，常用的坐标系是笛卡儿直角坐标系．这个坐标系以参考系上某一个固定点为原点O，以此原点沿三个互相垂直的方向引三条固定在参考系上的直线作为坐标轴，满足右手定则，通常记为x，y，z 轴，如图1-2 所示．

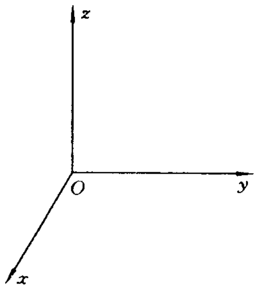

图1-2　空间三维坐标系

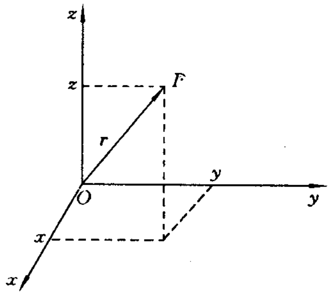

图1-3　质点位置矢量

三、位　矢

在某时刻t时，质点P在坐标系中的位置可用位置矢量$\boldsymbol{r}$来描述．位置矢量简称位矢，它是一个有向线段，其始端在坐标原点O处，其末端与时刻t时质点在坐标系中的位置重合，如图1-3 所示．$\boldsymbol{r}$ 在Ox，Oy，Oz 轴上的投影分别为x，y，z，位矢$\boldsymbol{r}$ 可

表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \tag{1-1}$$

$\boldsymbol{r}$ 的长度用 r 表示：

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$\boldsymbol{r}$ 的方向用 α,β,γ 描述：

$$\cos\alpha = \frac{x}{r} \qquad \cos\beta = \frac{y}{r} \qquad \cos\gamma = \frac{z}{r} \tag{1-2}$$

式中：α,β,γ 分别为 $\boldsymbol{r}$ 与 Ox,Oy,Oz 轴的正向的夹角.

四、运动表达式

在一个选定的参考系中，当质点运动时，它的位置 $P(x,y,z)$ 是按一定规律随时刻 t 而改变的，所以位置是 t 的函数. 这个函数可表示为

$$x = x(t) \qquad y = y(t) \qquad z = z(t)$$

它们叫作质点的运动表达式. 质点的运动表达式可写成直角坐标形式，也可写成极坐标形式、球坐标形式等. 选择的坐标不同，质点运动表达式也就不一样. 知道了质点的运动表达式就可以确定在任何时刻质点的位置. 如自由落体运动的质点的运动表达式为 $x=\frac{1}{2}gt^2$；匀速直线运动的质点的运动表达式为 $x=x_0+vt$；匀加速直线运动的质点的运动表达式为 $x=x_0+v_0t+\frac{1}{2}at^2$.

§2 位移 速度 加速度

一、位 移

如图 1-4 所示，在 xOy 平面直角坐标系中，有一个质点在时刻 t_1 的起始位置为 A 处，经过 $\Delta t=t_2-t_1$ 时间后，质点运动到了位置 B 处，质点的位矢由 $\boldsymbol{r}_A$ 变为 $\boldsymbol{r}_B$. 我们把由始点 A 指向终点 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 称为点 A 到点 B 的位移矢量，简称位移，可用 $\boldsymbol{r}_{AB}$ 或 $\Delta\boldsymbol{r}$ 表示.

由图 1-4 可以看出，矢量 $\boldsymbol{r}_A,\boldsymbol{r}_B,\Delta\boldsymbol{r}$ 刚好为三角形的三边，由三角形法则可以得出

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A$$

用平面直角坐标形式表示为

$$\boldsymbol{r}_A = x_A\boldsymbol{i} + y_A\boldsymbol{j} \qquad \boldsymbol{r}_B = x_B\boldsymbol{i} + y_B\boldsymbol{j}$$

故 $$\Delta\boldsymbol{r} = (x_B - x_A)\boldsymbol{i} + (y_B - y_A)\boldsymbol{j}$$

当质点在三维空间坐标系中运动时，有

$$\Delta\boldsymbol{r} = (x_B - x_A)\boldsymbol{i} + (y_B - y_A)\boldsymbol{j} + (z_B - z_A)\boldsymbol{k}$$

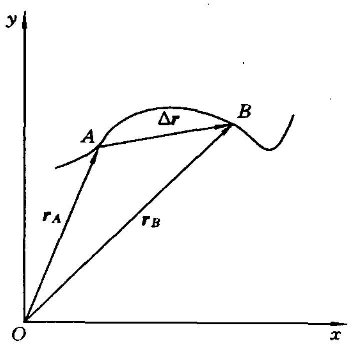

图 1-4 位移矢量

位移和路程是两个不同的物理量. 位移是矢量，不但有大小，还有方向，如图1-4中$\Delta\boldsymbol{r}$的方向为位置A指向位置B. 路程是标量，是指质点所经历的路程，一般用s表示. 质点从A点经过时间Δt后运动到B点，经历的路程为Δs，如果在经过时间Δt后，质点又从B点返回到A点，此时在$2\Delta t$这段时间内，质点的位移$\Delta\boldsymbol{r}=0$，而路程则为$2\Delta s$.

二、速　度

如图1-5所示，一质点在某个平面上沿轨迹$CABD$曲线运动. 在时刻t时，它处于A点，其位矢为$\boldsymbol{r}_{1(t)}$，在时刻$t+\Delta t$，它处于B点，其位矢为$\boldsymbol{r}_{2(t+\Delta t)}$，即质点在时间$\Delta t$内，完成了位移$\Delta\boldsymbol{r}$. 我们把质点的位移$\Delta\boldsymbol{r}$与相应的时间$\Delta t$的比值叫作质点在这段时间$\Delta t$的平均速度，用$\bar{\boldsymbol{v}}$表示，即

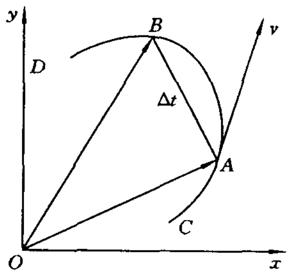

图1-5　平均速度

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1-3}$$

平均速度$\bar{\boldsymbol{v}}$是矢量，其方向与$\Delta\boldsymbol{r}$的方向一致. 在描述质点的运动快慢时，我们也常采用速率这个物理量. 在时间Δt内，质点所经历的路程为Δs，我们把Δs与Δt的比值$\frac{\Delta s}{\Delta t}$称为质点在$\Delta t$时间内的平均速率，平均速率为标量. 平均速率与平均速度在数值上不一定相等，如一质点在Δt时间内绕一闭合曲线环行一周，则在Δt时间内，该质点的平均速度为零，平均速率不为零.

要描述质点在某点的速度一般都采用瞬时速度，简称速度. 当$\Delta t\to 0$时，平均速度的极限值称为瞬时速度，用$\boldsymbol{v}$表示，则

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1-4}$$

由于在Δt趋向零时，质点所经历的路程Δs与质点位矢增量的大小Δr非常接近，近似相等，故瞬时速率$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$可认为等于瞬时速度的大小$|\boldsymbol{v}|$或$v$.

速度是矢量，其方向为Δt趋向零时$\Delta\boldsymbol{r}$的极限方向. 由图1-5可看出，当Δt无限减小而趋于零时，位移$\Delta\boldsymbol{r}=\overrightarrow{AB}$的方向无限接近于$A$点的圆弧切线方向. 质点做曲线运动时，它在某一点速度的方向就是沿该点的曲线切线方向.

在空间三维直角坐标系中，设位矢$\boldsymbol{r}$在坐标轴上的投影分别为x,y,z，则速度$\boldsymbol{v}$在坐标轴上的投影分别为

$$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\qquad v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\qquad v_z=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \tag{1-5}$$

速度表达式可写为

$$\boldsymbol{v}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k} \tag{1-6}$$

速度的大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \tag{1-7}$$

表 1-1 某些速率的数值

单位:m·s^{-1}

光在真空中	2.99792458×10^8
北京正负电子对撞机中的电子	99.999 998%光速
类星体的退行	2.7×10^8
太阳在银河系中绕银河系中心的运动	3.0×10^5
地球公转	3.0×10^4
人造地球卫星	7.9×10^3 以上
现代歼击机	约 9×10^2
步枪子弹离开枪口时	约 7×10^2
由于地球自转在赤道上一点的速率	4.6×10^2
空气分子热运动的平均速率(0 ℃)	4.0×10^2
空气中的声速(0 ℃)	3.3×10^2
机动赛车	1.0×10^2
猎豹	29
人百米赛跑世界记录	约 12
大陆板块移动	约 10^{-9}

例 1-1 设一质点的运动方程为$\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}$,式中:$x(t)=(2t+3)$m;$y(t)=(5t^2-2)$m.

(1) 求$t=5$ s 时质点的速度.

(2) 作出质点的运动轨迹图.

解 (1) 由题意可知,质点在x方向和y方向的速度分量的表达式为

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = 2\ \mathrm{m\cdot s^{-1}} \qquad v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = 10t\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

在$t=5$ s 时该质点的速度

$$\boldsymbol{v} = 2\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}\boldsymbol{i} + 50\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}\boldsymbol{j}$$

其大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{2^2 + 50^2} = \sqrt{2504}\ (\mathrm{m\cdot s^{-1}})$$

其方向与x轴正向的夹角

$$\theta = \arctan\frac{v_y}{v_x} = \arctan 25$$

(2) 由运动方程可知:$x(t)=(2t+3)$m,$y(t)=5(t^2-2)$m,联立方程消去变量t,可得质点的轨迹方程为

$$y=\frac{5}{4}x^2-\frac{15}{2}x+\frac{37}{4}$$

质点的运动轨迹如图 1-6 所示.

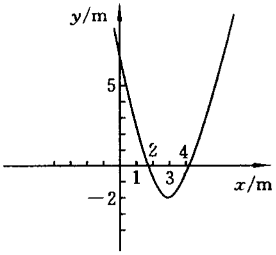

图 1-6　质点运动的坐标

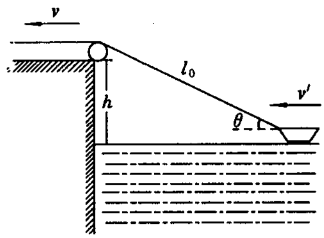

图 1-7　例 1-2 图

例 1-2　如图 1-7 所示，湖中有一小船，岸上有人用绳子跨过定滑轮拉船靠岸. 设滑轮距离水面高度为 h，滑轮到小船初始位置的绳子长度为 l_0，试求当人以匀速 $\boldsymbol{v}$ 拉绳时船运动的速度 $\boldsymbol{v}'$.

解　建立坐标系，取水平向右为 x 轴正向，竖直向上为 y 轴正向. 设在某时刻 t，小船的位置为 $x\boldsymbol{i}$，滑轮到小船的绳子长度为 l，则由直角三角形边长公式，有

$$x^2+h^2=l^2$$

式中：h 为一常量. 将上式两边同时对 t 求导，可得

$$2x\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=2l\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}=2l(-v)$$

由题知绳子的运动速度为 $\boldsymbol{v}$，船运行的速度为 $\boldsymbol{v}'$，则

$$\boldsymbol{v}'=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}=\frac{l}{x}(-v)\boldsymbol{i}=\frac{l_0-vt}{x}(-v)\boldsymbol{i}=\frac{l_0-vt}{\sqrt{(l_0-vt)^2-h^2}}(-v)\boldsymbol{i}$$

$$=-\left[1-\frac{h^2}{(l_0-vt)^2}\right]^{-\frac{1}{2}}v\boldsymbol{i}$$

三、加速度

前面已经指出，位移和速度是用来描述一个质点在某时刻的位置及其运动状态的. 加速度是描述质点的速度变化程度的一个物理量. 如图 1-8 所示，质点在某个平面内运动，在时刻 t 位于 A 点，其速度为 $\boldsymbol{v}_A$，在时刻 $t+\Delta t$ 位于 B 点，此时的速度为 $\boldsymbol{v}_B$，在此段时间 Δt 内，质点的速度的增量

$$\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A$$

质点的平均加速度被定义为

$$\bar{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}$$

平均加速度是描述在时间 Δt 内速度的平均变化率，其方向为 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的方向. 为了精确描述质点在任一时刻 t 的速度变化率，我们引入了瞬时加速度的物理量，也称为加速度，其定义为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1-8}$$

加速度是矢量，其方向为 Δt 趋向零时 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向. 同样，加速度在三维直角坐标系中也可表示为

$$\boldsymbol{a} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k} \tag{1-9}$$

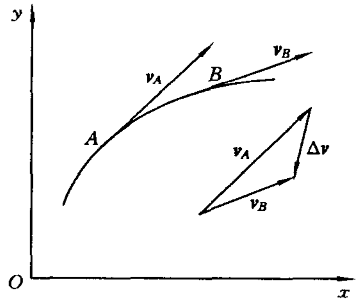

图 1-8　曲线运动的加速度

式中：a_x, a_y, a_z 为加速度 $\boldsymbol{a}$ 在 x, y, z 坐标轴上的分量，即

$$\begin{cases} a_x = \dfrac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} \\ a_y = \dfrac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} \\ a_z = \dfrac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} \end{cases} \tag{1-10}$$

其大小为

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \tag{1-11}$$

加速度方向与速度方向不能等同. 当物体做直线运动时，如果物体的速率是增加的，则 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 同向；如果物体的速率是减小的，则 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 反向. 如果物体做速率相等的圆周运动，某一点速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向为曲线在该点的切线方向，而 $\boldsymbol{a}$ 的方向为由该点指向圆心的法线方向.

表 1-2　某些加速度的数值

单位：$\mathrm{m \cdot s^{-2}}$

超级离心机中粒子的加速度	3×10^6
步枪子弹在枪膛中的加速度	约 5×10^5
使汽车撞坏（以 27 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ 的车速撞墙）的加速度	约 1×10^3
使人发晕的加速度	约 70
地球表面的重力加速度	9.8
汽车制动的加速度	约 8
月球表面的重力加速度	1.7
由于地球自转在赤道上一点的加速度	3.4×10^2
地球公转的加速度	6×10^{-3}
太阳绕银河系中心转动的加速度	约 3×10^{-10}

例 1-3 一个物体在光滑平面上做加速直线运动，其加速度大小$a=-1.5v$. 在$t=0$时，物体的速度为 10 m · s^{-1}. 求：

(1) 物体经过多长时间后可以被认为已处于停止状态？

(2) 在物体被认为停止后，其共行驶的路程有多长？

解 物体做加速直线运动，其加速度$a=-1.5v$，负号表示加速度方向与速度方向相反. 由加速度定义，可知

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-1.5v$$

两边积分，得

$$\int_{v_0}^{v}\frac{1}{v}\mathrm{d}v=\int_0^t(-1.5)\mathrm{d}t$$

$$\ln\frac{v}{v_0}=-1.5t$$

$$v=v_0\mathrm{e}^{-1.5t} \tag{1-12}$$

根据速度定义，可知

$$v=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=v_0\mathrm{e}^{-1.5t}$$

两边积分，得

$$\int_0^r\mathrm{d}r=\int_0^t v_0\mathrm{e}^{-1.5t}\mathrm{d}t$$

$$r=\frac{v_0}{-1.5}(\mathrm{e}^{-1.5t}-1)=\frac{v_0}{1.5}(1-\mathrm{e}^{-1.5t})\ \mathrm{m} \tag{1-13}$$

从式(1-12)可以看出，要使$v\to0$，须有$t\to+\infty$. 在现实情况下往往是取t为某一值时，物体运动非常缓慢，可以近似认为物体已处于停止运动状态. 根据式(1-12)和(1-13)，可列出如下数据：

表 1-3 由式(1-12)和(1-13)列出的数据

	$v_0/10$	$v_0/100$	$v_0/1000$	$v_0/10000$
时间t/s	1.5	3.1	4.6	6.1
速度y/m	6	6.6	6.66	6.666

从上表可以看出，当$t=6.1$ s 时，可以认为物体已处于停止状态，其行驶的路程共有 6.666 m.

例 1-4 一辆卡车为了超车，以 90 km · h^{-1}的速度驶入左侧逆行道时，猛然发现前方 80 m 处一辆汽车正迎面驶来，假定该汽车以 65 km · h^{-1}的速度行驶，同时也发现了卡车超车. 设两司机的反应时间都是 0.7 s(即司机发现险情到实际启动刹车所经过的时间)，他们刹车后的加速度的大小都是 7.5 m · s^{-2}，试问两车是否会相撞？如果相撞，相撞时卡车的速度多大？

解 设两车相撞，司机发现危险情况到相撞的时间为t，则卡车行驶的距离s_1为

$$s_1 = v_1 t + \frac{1}{2}a(t-0.7)^2 \qquad (\mathrm{SI})$$

由题中已知条件，卡车的初速度$v_1=90\ \mathrm{km\cdot h^{-1}}=25\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，$a=-7.5\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$，则

$$s_1 = 25t - \frac{7.5}{2}(t-0.7)^2 \qquad (\mathrm{SI}) \tag{1}$$

从发现危险情况到相撞，汽车行驶的距离为s_2，则

$$s_2 = v_2 t + \frac{1}{2}a(t-0.7)^2 \qquad (\mathrm{SI})$$

将已知条件$v_2=65\ \mathrm{km\cdot h^{-1}}=\frac{325}{18}\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$代入，得

$$s_2 = \frac{325}{18}t - \frac{7.5}{2}(t-0.7)^2 \qquad (\mathrm{SI}) \tag{2}$$

由题知

$$s_1 + s_2 = 80\ \mathrm{m} \tag{3}$$

联解(1)、(2)、(3)，得

$$t_1 = 2.3\ \mathrm{s} \qquad t_2 = 4.8\ \mathrm{s}(\text{舍去}) \tag{4}$$

设相撞时卡车的速度为v'，则满足以下公式：

$$v' = v_1 + a(t-0.7) \qquad (\mathrm{SI}) \tag{5}$$

将(4)代入(5)，可得

$$v' = 13\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

§3 圆周运动及其描述

圆周运动是曲线运动的一个重要特例，研究圆周运动的规律是研究其他复杂曲线运动的基础.

一、平面极坐标系与自然坐标系

在研究圆周运动时，采用平面直角坐标系显得比较复杂，这里介绍一下平面极坐标系与自然坐标系.

设有一质点在xOy平面内运动，如图1-9所示.某时刻它位于A点，它的位矢$\boldsymbol{r}$与Ox轴正向夹角为θ，于是质点在A的位置可用(r,θ)来描述.这种以(r,θ)为坐标的参考系称为平面极坐标系.它与平面直角坐标系的变换关系式为

$$\begin{cases} x = r\cos\theta \\ y = r\sin\theta \end{cases}$$